

DOI: 10.3901/JME.2010.19.092

## 重型制造装备国内外研究与发展\*

高 峰<sup>1</sup> 郭为忠<sup>1</sup> 宋清玉<sup>2</sup> 杜凤山<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240;

2. 中国第一重型机械集团公司设计院 大连 116600;

3. 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

**摘要:** 制造业是创造人类物质财富和社会文明的手段和源泉,是我国实现新兴工业化的基础保证,诸多学科研究成果必须通过制造转化为人类需求的产品和生产力。20 世纪末以来,国际上涌现出体现核心竞争力的高科技产业发展潮流,资源、能源、环境的严峻挑战,呼唤出现全新概念的制造科学与技术。国家重大战略工程必须由极端制造能力提供保证与支撑。极端条件下可靠服役已成为复杂制造装备的基本特点和要求,这给制造科学赋予了新的内涵。重型制造装备特点是尺度巨型、载荷巨大、惯量巨大、自由度多、力位操控能力强等,这些给该类装备的设计与制造带来严峻挑战。人造系统的能量与物质转换规律是制造科学的研究对象。以巨型自由锻造压机、重型锻造操作机、大型模锻多连杆和伺服压机、轧钢机、重型机床等代表性的重型制造装备为对象,分析该领域国内外发展现状和趋势,提出重型制造装备面临的基础科学与技术问题,即重型制造装备工艺参数模型与性能评价、装备机构和结构拓扑与性能的映射规律、重型制造装备大功率高精度快响应运动与动力容错驱动规律、重载制造装备多变量强耦合机电液多系统交互作用与控制规律等,为我国重型制造装备的发展战略研究提供参考。

**关键词:** 制造业 重型制造装备 研究与进展

**中图分类号:** TG156

## Current Development of Heavy-duty Manufacturing Equipments

GAO Feng<sup>1</sup> GUO Weizhong<sup>1</sup> SONG Qingyu<sup>2</sup> DU Fengshan<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

2. Dalian Design and Research Institute, China First Heavy Industries, Dalian 116600;

3. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinghuangdao 066004)

**Abstract:** Manufacturing is the means by which material wealth and civilization are created and as such it has been fueling the growth of new industrialization in our country. It takes manufacturing to transform the results of research and technological development in many fields into products that fulfill human needs and improvement in productivity. Since the turn of the century, core competencies coming forth in the world are high-tech industries. Severe challenges facing us today due to dwindling natural resources, non-renewable energy sources as well as worsening environment call for a brand new thinking in the development of manufacturing science and technology. The national strategic projects have to be supported by extreme manufacturing capability. Reliable service under extreme conditions becomes basic characteristics and requirement for complex manufacturing equipment. Heavy-duty and large capacity manufacturing equipment, due to huge size, heavy payload, large inertia, multi degree-of-freedom, dexterous manipulability, extreme service conditions, is much more difficult to design and manufacture. The principles for energy and matter transformation of man-made systems are the research subjects of manufacturing science. The heavy-duty manufacturing equipment is studied such as super-capacity freeform forging machines, heavy-duty forging manipulators, large payload multi-link

\* 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2006CB705402973)、国家重大科技专项(2009ZX04002-061, 2009ZX04013-021)和国家高技术研究发展计划(863 计划, 2009AA044102)资助项目。20091207 收到初稿, 20100322 收到修改稿

mechanical presses and servo mechanical presses, rolling mills, and heavy-duty machine tools. It reviews the development trend in this field and analyzes the gap between China and the state of art in the world. It proposes fundamental scientific and technological issues facing the development of heavy-duty manufacturing equipment including process models and performance evaluation criteria, mapping rules between mechanism and structure topology and performances, principles of fast response of high power and precision, and fault-tolerant drives, as well as interaction and control of electric and hydraulic coupled systems. The research presented in this paper contributes to China's technological development strategy for heavy-duty manufacturing equipment.

**Key words:** Manufacturing industry Heavy-duty manufacturing equipment Current research and development

## 0 前言

制造业是创造人类物质财富和社会文明的手段与源泉,是国家实现新兴工业化的基础保证,诸多学科的研究成果必须通过制造转化为人类需求的产品和生产力。由于人造系统的能量与物质转换规律是制造科学的研究对象,人类的需求是制造学科发展的动力,因此制造科学研究要永远围绕社会经济发展的需求和科学前沿,制造业必须能够适应现代社会、现代工业、现代经济可持续发展的生存环境,使国家形成抵御金融风暴和经济危机的能力。制造业承担着史无前例的国家重任,要为新兴工业化提供全部物质制造的能力;同时面临着新世纪能源、资源、环境的挑战,要为我国新型工业化的实现提供全新的技术<sup>[1-2]</sup>。近年来,新能源和新材料利用、空间和海洋资源利用等相关领域的发展对制造装备的研究提出了前所未有的挑战。国家重大战略工程必须由制造业的极端制造能力提供保证与支撑。极端条件下的可靠服役已成为复杂制造装备的基本特点和要求,这对制造科学赋予了新的内涵。

美国、德国、日本、韩国等工业发达国家高度重视制造领域的基础研究,在通过基础研究快速发展工业方面取得了很好的经验。如美国在2000年设立的28项国家关键技术研究计划把制造列为第一位;2008年美国标准局发布的APT计划中确定的5个领域包括能源、材料、电器、信息、制造;美国机械协会2008年的研究报告“未来制造”把氢能制造和纳米制造列为重点发展领域;美国政府和一批企业共同设立“2 μm”计划,目的在于大幅度提高工业产品的制造质量。

重型制造装备是制造产业链中重要的关键基础装备,体现国家极端制造能力和制造水平,是国民经济和国防安全的重要保障。近十几年来,随着世界高新技术惊人的发展,人类进行的工程越来越庞大,对所采用的设备不仅提出了越来越高的质量要求,而且设备的服役条件趋于极端化,如超超临界发电机组、百万千瓦级核电设备、深海石油开采

钻探设备、空间探索的巨型飞机与火箭等等,这些极端服役大型复杂装备及其构件的制造依赖于巨型重载制造装备的能力与水平。代表性的重载加工装备包括大型模锻压机、自由锻造压机、重型锻造操作机、轧钢机、重型机床等。重型制造装备的特点是尺度巨型、载荷巨大、惯量巨大、自由度多、力位操控能力强、工作服役环境复杂等。

巨型装备,如百万千瓦核电装备、大型核聚变装备、超和超超临界发电机组、大型燃气轮机、全断面隧道掘进机、万吨级压机、巨型船舰、大型煤液化装置、大型飞行器、国防科技重大装备等制造过程具有高温、高压、高载荷等强外场作用特征。核电机组压力容器单件净重高达256 t,其中堆芯段单件净质量180 t,需要500 t钢锭进行锻造,蒸发器壳体质量达330 t。目前世界上极限制造能力水平最大钢锭达600 t,最大铸件500 t,最大锻件450 t,最大焊接件2000 t。大型构件的制造是现有技术条件下的极端制造,体现了世界制造科技的前沿。

目前我国在大型构件制造方面落后于世界先进水平,还不具备300 t以上钢锭的大件制造能力,船舶、电力等大型工业装备制造难以摆脱对国外的依赖。如电力行业每年需要约200根300 MW以上火电机组的低压转子,而我国目前的制造能力每年不足10%。大型的船用柴油机曲轴还依赖进口。虽然目前我国的重载制造装备技术水平有了长足的进步,拥有万吨级以上的自由锻造压机6台,我国装备的最大模锻水压机达到300 MN,并具备了万吨级锻造压机的自主设计与制造能力,但相比之下,我国在多自由度重载操作装备方面的研究十分薄弱。操作装备技术落后严重影响我国大型复杂构件的制造能力、制造质量和制造效率。譬如我国锻件材料利用率为50%~55%,而韩国为60%~65%,日本则高达70%~75%。因此,开展极端条件下制造科学的基础研究,提升我国大型装备及关键零部件的独立制造能力和制造水平,是建设“制造强国”的基础,体现了国家重大需求。

作为世界制造大国和资源消耗大国,极端制造已成为我国制造科技的发展重要方向之一。加强极

端制造装备的基础科学和关键技术研究,对提升我国制造业的自主创新能力和装备制造技术水平有明显的意义,是建设制造强国的必由之路。目前我国的极端制造技术研究面临前所未有的发展机遇:首先,我国核电、火电、化工、造船、航空航天等产业对极端条件下的节能、节材制造技术以及巨型重载装备提出了迫切需求;其次,以中国第一重型集团公司(以下简称一重)、中国第二重型集团公司(以下简称二重)、上海重型机器厂(以下简称上重)为代表的我国重机行业现有的装备水平和生产能力难以满足迅速增长的市场需求,正在进行大型制造装备的建造和改造。2003年以来,我国973计划设立有关重型装备的项目包括:“数字化制造基础研究”、“巨型重载操作装备的基础科学问题”、“大型动力装备制造基础研究”、“全断面大型掘进设备设计制造中的基础科学问题”、“大型风力机的空气动力学基础研究”、“核主泵制造的关键科学问题”、“超高速加工及其装备的基础研究”等。《国家中长期科学和技术发展规划纲要》将极端制造列为未来15年优先发展的前沿方向。

长期以来,我国高端重型制造装备依赖发达国家的知识产权和设计技术,具有原创性和自主知识产权的重型制造装备较少,主要原因是我国高端装备制造技术落后,企业对复杂重型制造装备设计理论和技术以及手段缺乏系统研究。重型制造装备设计具有大量的科学和技术挑战,如基于工艺要求的大型制造装备性能评价数理模型、重载冗余约束系统的机构结构拓扑与性能的映射规律、大功率高精度快响应的运动与动力容错驱动规律、多变量强耦合机电液多系统交互作用与控制规律等、极端条件下重型制造装备的可靠服役与失效规律等。中国提出走新型工业化道路,在2020年实现成为世界制造强国的战略目标,加强重型制造装备基础科学研究,提升制造技术的自主创新能力和引领能力是实现该目标的关键。因此,开展巨型重载制造装备的基础科学研究体现了国家重大需求,对提升我国巨型重载制造装备的独立设计与制造能力和国际竞争力具有重要意义,已成为我国制造业发展的当务之急<sup>[3-6]</sup>。

## 1 巨型锻造压机

万吨级锻造压机是超大型锻件制造的核心装备,它制造的大锻件直接影响国家发展和国民经济建设,提高大型锻件的制造能力和技术水平符合国家发展战略,具有重大的社会意义和经济价值。锻

造压机包括水压机和油压机两大类。从综合技术性能看,油压机要优于水压机。

### 1.1 国外现状

世界上以欧美和日韩为代表的发达国家,锻造压机技术一直处于领先地位,尤其是劳动生产率远远高出世界平均水平。自1893年美国制造出世界上第一台万吨级自由锻造水压机以来,全世界共有二十几台万吨级自由锻造压机。

东欧的锻造液压机历史悠久,在设计制造和使用方面有许多独到之处,特别是老式压机的技术比较典型,但多数都经过了现代化改造,配备了操作机和程序锻造系统。俄罗斯依若斯基重机厂拥有由英国Davy公司设计制造的120 MN锻造水压机,1986年由德国HASENCLEVER公司改造,主机经过了大修,主体结构没变,但更换了先进的水压和电气控制系统,成为目前世界最大的2 500 kN/6 300 kN·m锻造操作机。马尼亚布加勒斯特重型机器厂具有由德国SMS-MEER公司1986年设计制造的120/150 MN锻造水压机,采用了先进的水压和电气控制系统,配备2 000 kN/4 000 kN·m锻造操作机。西欧的锻造液压机特点分明,以二战为分界点。战前的技术与东欧相似,但战后现代工业尤其是控制技术的进步,使大型压机的设计制造技术发展迅速。

意大利Terni公司拥有由英国Davy公司设计制造105/126 MN锻造水压机,主机的突出特点是立柱的导向部分加工成方形断面,间隙可调,1992年由意大利Innse和德国Mannesmann Demag公司联合改造,更换了先进的水压和电气控制系统。德国Saarrschmiede钢铁公司配有由德国SMS MEER公司制造的85 MN锻造水压机,主机为四柱下拉式和油压控制,配备了德国DDS公司800 kN/2 000 kN·m操作机,可与主机联动,实现了程序锻造,代表着当今世界最新技术水平。法国Le公司拥有由德国Pahnke工程公司设计的两台水压机,分别是传统形式的75 MN水压机和90/110 MN水压机,主机特点是采用上传动、双立柱、平面可调间隙导向、多拉杆结构形式。

日本铸锻钢(JCFC)公司户畑工厂的80/100 MN锻造油压机是由德国Pahnke工程公司设计、德国Sack和日本三菱公司合作制造,配备了2 400 kN·m操作机。日本制钢所(J.S.W)室兰工厂的80/100 MN锻造水压机,配备了2 400 kN·m操作机。该压机曾经锻造出世界最大的570 t钢锭。日本神户制钢所(Kobe Steel)具有由英国Davy-Loewy公司提供的130 MN水压机,后来德国

SMS MEER 公司对其进行了现代化改造。韩国斗山集团(Doosan)的 100/130 MN 水压机全套设备由德国 SMS MEER 公司 1979 年提供。主机是传统结构,三梁、四个圆立柱导向。这两台水压机带有锻件尺寸测量、温度测量以及工业电视监控系统,并配备了 SMS 公司的 2 000 kN/4 000 kN·m 操作机并能联动控制,采用了程序锻造技术,锻件质量和生产效率很高,体现了当代国际先进水平,在大锻件市场具有很强的竞争力,尤其对我国的锻件市场影响较大。

美国和加拿大的锻造技术水平和设备能力自二战以后有了飞跃式的发展。100 MN 以上的水压机有多台,且都经过了现代化改造,产量和质量都一直居世界前列。巴西近年来随着工业化进程的加速,锻造技术和装备也有较大提高。印度也在大力发展本国的锻造技术,新上了多台快锻机组。

近年国际上建造的 45 MN 以下中小型液压机一般采用下拉式结构,用油压传动并配有 1 至 2 台操作机以实现联动控制,配备了程序锻造系统,可实现自动锻造,效率及尺寸精度高,产量大,可以大幅度提高材料利用率。此类锻造液压机设计制造技术已很成熟,几乎遍布世界各地的工厂,其典型配置如图 1、2 所示。该类压机用于外形规则的大批量锻件的生产,如长轴类及长板类锻件。

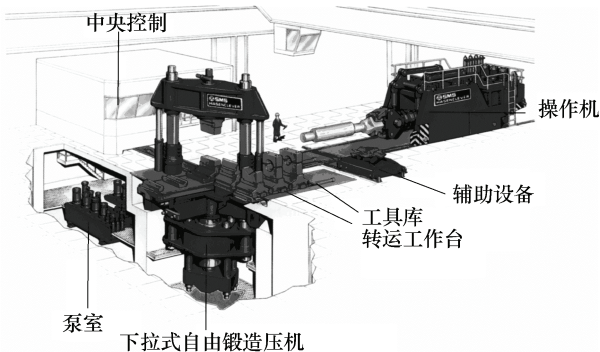


图 1 中小型自由锻造液压机典型配置

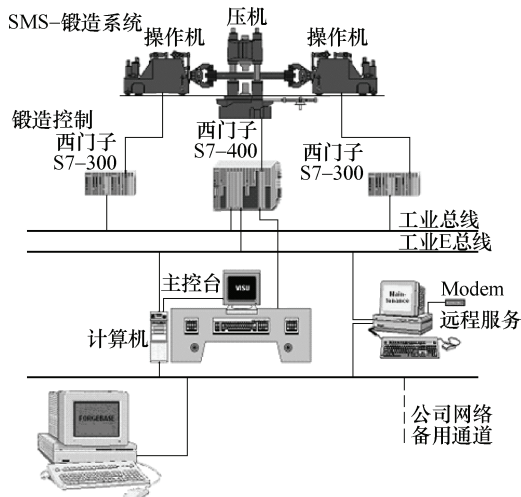


图 2 自动锻造技术

美、欧、日等发达工业国家在 80 MN 以上大型锻造液压机方面具有坚实的基础。目前世界上最大的自由锻造压机已经达到 150 MN,辅助机械配备齐全,而且多数经过现代化改造,生产能力和技术水平明显提高。主要发展趋势如下所述。

(1) 压机压力不断提高。随着 600 MW 以上电站以及超临界和超超临界机组、5 m 以上宽厚板轧机、1 000 t 级以上反应器的出现,市场对大型特殊材料转子、大型支撑辊及筒节、封头等大型锻件的需求迅速增长。因而对液压机的锻造压力要求也同步上升,液压机的最大压力已经达到 150 MN,正拟建造近 200 MN 的压机。

(2) 辅机配备更加齐全。多数机组配备了锻造操作机、工具操作机,有的配有大截面切割机、大尺寸测量系统等先进的辅助设备。

(3) 控制水平显著提高。油压控制一般用于中、小型压机,大型压机,尤其是特大型压机仍为水压控制。电气及液压控制技术的发展几乎在大型压机上都有体现。油压机已全部采用比例或伺服控制技术;水压机已采用水压比例控制;几乎全部实现了“主机—操作机”联动及程序锻造;电气控制均采用了“工控机—可编程控制器—网络通信”技术。自动化水平大大提高。生产效率和锻件尺寸精度大幅度提高,同时锻件质量和产量也大大提高。

(4) 本体结构基本上是三梁、三缸、四柱、移动工作台结构,这一点没有大改变,仅有少数几台是双柱或下拉式结构。本体结构上的主要区别之一是立柱导向形式,以圆立柱导向、固定间隙者居多,其中个别压机圆立柱的导向间隙可调,但调整很不方便且不易解决运动间隙和产品精度的矛盾。近年来方立柱渐多。其二是立柱的预紧方式,局部预紧仍占绝大多数,仅有少数压机是全预紧。局部预紧是指立柱仅在上、下横梁处有预应力,在占总长度 3/5 的中间部位没有预应力,立柱的受力状况差,在长期重载、交变应力作用下易造成疲劳破坏,这是压机目前存在的大问题。

## 1.2 国内现状

我国自 1953 年沈阳重型机器厂修复 20 MN 水压机并投入生产以来,全国相继建成投产 10 MN 及以上水压机总计约 72 台。其中 60 MN 及以上大型自由锻造水压机有 9 台,分别分布在东北的第一重机厂(150 MN 一台、120 MN 一台、60 MN 一台)、华北的天津重机厂和北京重机厂(60 MN 各一台)、中原的洛阳矿山机器厂(80 MN 一台)、华东的上海重机厂(165 MN 一台、125 MN 一台)以及西南的第二重机厂(140 MN 一台、120 MN 一台)。

20 世纪 80 年代后期,随着市场经济的不断发展,江苏、浙江、山东等地的一些乡镇企业和一批私营企业逐渐开办了一些中型和大型锻造厂,装备了 10 MN、20 MN、31.5 MN、36 MN 的水压机和油压机,60 MN 的水压机已经落户到了私人企业。这些新上的企业已经占有了全国锻件市场的相当份额,而且还有更强劲发展势头,已在拟建造 120 MN 级锻造液压机。

到目前为止,全国生产大锻件的主力设备仍然是 20 世纪 50~70 年代生产的锻造液压机。这些锻造液压机,可分为两类,一类是传统结构,主机大多是三梁四柱上动式,传动形式大多为水泵蓄势器传动,操纵形式大多为“接力器”式控制的提升阀分配器控制。锻造的配套设备主要是锻造行车加翻料机。第二类就是所谓的“快锻压机”,其主机是两柱下拉式。这类压机均为液压泵直接传动,控制方式是“电液伺服”控制,可以较精确地控制行程大小,主机本身还可以使“上砧”旋转,带有横向移砧台,自动换砧库,有的还加上了可旋转的运料小车等。国内 20 世纪中期建造 100 MN 以上的大型锻造水压机有 3 台,分别应用在一重、二重、上重。图 3 所示为二重 120 MN 锻压机。

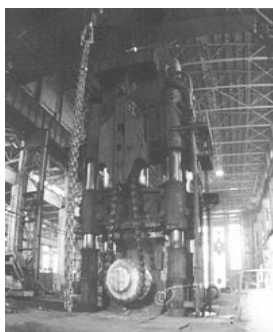


图 3 二重 120 MN 锻压机

20 世纪中期建造的 3 台大型锻造水压机结构特点为:水压机本体结构型式均为三缸、三梁、四柱、上传动;一重、二重的水压机横梁为铸钢组合结构,上重的水压机横梁为板焊结构;立柱都是局部预紧、圆柱面导向、间隙不可调;水压控制系统均采用传统的提升锥阀系统、人工(大手把)操作;只配有工具操作机,没有锻造操作机;缺少锻件尺寸精度控制装置。因而,三台水压机都存在着机械化水平低、锻件精度差、生产效率低的突出问题。此外,这三台水压机目前都存在原始设计制造上的缺欠。其中,一重的 125 MN 水压机由沈阳重型机器厂生产的下横梁存在铸造缺陷,一直不能满负荷使用;上重的 120 MN 水压机由于采用钢板焊接结构横梁,刚度较差,且当时的生产条件无法满足设计要求,实际

出力没有达到设计参数。二重的 120 MN 水压机由模锻改为自由锻,参数不太适应大锻件工艺的需要。而且这三台压机经过 40 多年的运行,都已经达到设计寿命,本体一些关键零部件已出现结构失效,控制系统都存在较大的隐患,大修已经不能完全解决问题,一旦出现故障,很难在短时间内恢复生产,将严重威胁我国大型锻件的生产。因此迫切需要研制新的大型自由锻造设备,以满足国内、国际市场的需求。

为满足国内外市场对大锻件的需求,解决我国大型锻造液压机面临的紧迫问题,赶超大型锻造液压机世界先进水平,必须建造压力为 130~150 MN、且技术达到国际先进水平的大型锻造液压机。因此,国内主流重机厂(一重、二重、上重等)正在纷纷改造和建造新的大型自由锻造压机。二重开发出 140 MN 锻压机,一重自主设计和建造出最重最新的 150 MN 水压机(图 4),上重建造出西安重机所设计的最重最新的 165 MN 锻造油压机(图 5),使得我国成为世界大锻件制造大国。

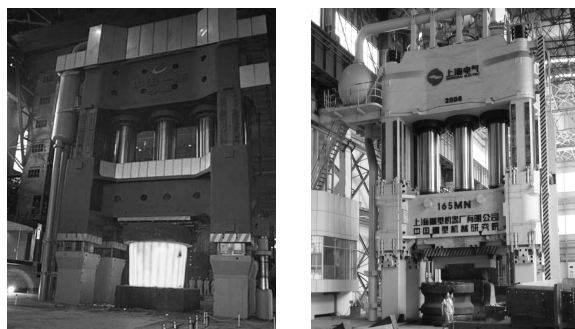


图 4 一重 150 MN 锻压机 图 5 上重 165 MN 锻压机

2008 年,中国第一重型机械集团自主设计和建造的 150 MN 水压机获国家科技进步一等奖。该压机是针对国内大型锻件制造瓶颈而研制的世界上最大的巨型水压机,可用于电力、冶金、石化、造船、国防等行业急需的关键大型锻件制造,其技术和装机水平是一个国家综合实力的标志之一,关系国民经济发展和国家安全。该水压机压力为 150 MN,总高 24.98 m,可锻造 600 t 级特大型钢锭,锻件最大直径 6.8 m、最大长度 25 m。主要创新是:① 提出巨型水压机平接式全预应力组合框架新型预应力结构,从根本上解决了立柱受力恶劣、高应力的难题;② 提出巨型水压机的方立柱 16 面可调间隙的平面导向结构,大幅度提高了活动横梁的导向精度,避免了间隙过小引起的横梁研伤立柱或运行卡死等事故的发生,提高了水压机运行平稳性和锻件尺寸精度;③ 提出了巨型水压机主缸油—水联合先导控制高压大流量水阀及活动横梁位置自适应预控技术,消除了水压机长期以来未能解决的“水击现象”;

④ 大型关键构件设计、制造及大型组合构件的有限空间安装技术, 设计了当今世界最大的质量 500 t 级的特大型整体箱形铸钢上横梁及活动横梁, 避免了组合横梁长期运行造成结构失效的问题, 解决了特大型箱体腔砂芯的排气和砂芯固定及大吨位钢水浇注的质量控制难题。该 150 MN 压机的研制成功体现我国具有万吨以上压机自主设计的能力, 提高了国力, 有力地促进了我国能源、石化、冶金、造船、国防等行业的发展及技术进步, 其研制中开发的技术对于我国重大制造装备的设计制造具有重要的意义。

近期, 国家发展改革委批复了中国第二重型机械集团公司大型模锻压机建设项目的可行性研究报告, 项目拟建设的大型模锻压力机最大压力可达 800 MN, 是目前世界上最大的模锻压机, 超过了此前世界最大的俄罗斯 750 MN 模锻压机。

## 2 大型自由锻造操作装备

巨型重载锻造操作装备是大型锻件精准制造的基本装备, 与巨型自由锻造压机配合实现锻造作业, 能极大提高锻件制造质量和效率, 降低成本。巨型重载锻造操作装备的特点是载荷大、惯量大、自由度多、多维力位操控能力强。随着我国核电、能源、造船、冶金、国防等行业的快速发展, 我国对大型锻件需求急剧增加, 但我国大型锻件的制造能力和技术水平与国际相比存在较大差距。国际上通过配备重载锻造操作装备, 大幅提升了锻造效能。如意大利为 126 MN 水压机配备 1 500 kN·m 锻造操作机, 生产效率提高 25%, 加工余量减少 10%, 降低能耗 20%; 日本室兰制作所 20 世纪 90 年代为四台水压机配备操作机后, 生产效率提高 1.85 倍。为提升技术水平, 国内主流重机厂(一重、二重、上重等)正在纷纷改造和建造新的大型自由锻造压机, 并配备巨型重载锻造操作装备。其中, 大型自由锻造压机由我国自主研发, 但巨型重载锻造操作装备还无法自主设计, 只能依靠国外设计技术。目前, 国内现有 60 MN 以上的自由锻造机均未配备锻造操作装备, 其技术改造对巨型重载锻造操作装备的需求量大。

### 2.1 国外现状

国际上 60 年前锻造操作机就已问世。最早在美国、前苏联, 而后在日本、英国、奥地利等国发展起来, 成为系列化产品并进入工业性生产。最初的操作机多为全机械传动, 到 20 世纪 60、70 年代出现了混合传动、全液压传动、结构紧凑、操作灵

活的锻造操作机。它与锻造压机配合使用, 大大提高了生产效率、提高了锻件精度和质量、提高了材料利用率、降低了能耗。

意大利以一台新型的三主缸四方柱结构的 126 MN 水压机代替原有的 120 MN 水压机, 并增加一台最大可切割 3 m 直径的大截面切割机和 1.5 MN·m 锻造操作机。1990 年 10 月投产以来, 新水压机比老水压机提高生产效率 25%, 直接劳动力减少 20%, 锻件重量降低 6%, 加工余量减少 10%, 天然气节约 20%, 达到降低成本、工艺流程合理、工作环境条件改善、市场竞争力提高的目的。日本对锻造水压机的技术改造, 重点是配备锻造操作机、工具操作机、大截面切割装置等, 以提高生产率。神户制钢所采用 4 MN·m 锻造操作机, 比原来采用两台锻造行车的锻造操作生产方式提高效率 1.6 到 2 倍。日本还拥有一台 5 MN·m 的锻造操作机。俄罗斯拥有一台德国西马克米尔斯(SMS)公司制造的 6.3 MN·m 的锻造操作机, 是目前世界上最大的锻造操作机, 如图 6 所示。



图 6 德国 SMS 公司制造的 6.3 MN·m 的锻造操作机

### 2.2 国内现状

我国第一重机厂于 1985 年引进了日本三菱公司制造的锻造操作机并用于 60 MN 的水压机。目前一重、二重、上重三家重机厂正在引进德国 SMS 和 DDS 公司设计的巨型重载锻造操作装备, 2007 年国家支撑计划分别支持了一重和上重的德国 SMS 公司设计的 6.3 MN·m 锻造操作机的关键制造技术研究, 目的在于大型锻造操作装备制造技术的引进消化吸收工作, 但该项目没有解决自主设计和自主知识产权问题, 仍依赖德国的设计技术。

为解决操作机自主设计问题, 2006 年国家 973 计划设立“巨型重载操作装备的基础科学问题”研究项目, 为巨型重载操作装备系统的自主化设计开发奠定理论基础, 图 7 所示为上海交通大学与中国第一重型机械集团公司联合设计的 2 000 kN/4 000 kN·m 操作机。

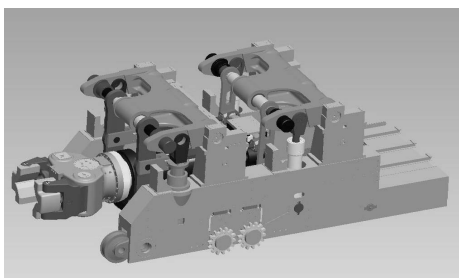


图7 上海交通大学与一重设计的操作机

国内操作机设计技术和水平与国外相比差距很大。我国的操作机专业制造厂家不多,主要有兰州石化机械厂、青岛华东工程机械有限公司、河南安阳锻压机械工业有限公司等。与发达国家相比差距主要表现在缺乏有自主知识产权的操作机整机方案设计能力,缺乏操作机整机机构和结构设计技术,缺乏操作机与压机的联动控制技术。

重载锻造操作机的机械结构设计包括机构设计、运动副界面设计、力学性能优化等内容。机构设计的任务是设计机构构型与尺寸参数,以满足特定的末端自由度和操作性能要求。重载操作装备主要采用并联机构为运动和动力传动装置,近年来并联机构设计成为国际学术界的研究热点<sup>[7-8]</sup>。重载操作装备除了须满足末端位姿操作性能要求外,在整个工作空间中还须具备理想的刚度特性、力承载特性及动力学性能。此外,在重载操作装备中广泛采用冗余约束驱动结构。从国际现有的研究来看,锻造操作机机构设计仍缺乏系统的研究,是一个有待解决的问题。

在低速重载机械中因运动副的相对线速度低无法形成动压润滑,轴承的载荷高达数百吨且伴随着偏载、高温和非连续冲击载荷作用,特别是高副接触区应力集中导致弹塑性变形以及裂纹和粘着,流体润滑、薄膜润滑和边界润滑状态共存,低速重载条件下接触区的润滑规律、固体表面与润滑分子的匹配关系、摩擦副的失效机制等是国际学术界研究的难点。为避免大载荷作用下润滑膜破裂、高副接触区的弹塑性变形等问题,轴承材料的确定、结构的设计和表面处理技术尤为重要。由于工作状况不同,大型轴承的使用寿命也不同。因巨型重载操作装备机构复杂,部件更换难度大,因而要求其运动副轴承的寿命与操作机的服役寿命相同(15~20年以上)。揭示大尺寸、重载、低速非连续工况下摩擦副界面的应力分布、表面结构、润滑性能演变、摩擦副损伤和润滑失效行为之间的关系,是支持巨型重载操作装备运动副设计和制备的基础。

巨型重载锻造操作机结构拓扑设计是其寿命和可靠性的保证。结构拓扑优化是近20多年来迅速

发展的一门学科,已成为计算力学的一个重要分支。结构优化设计可以改善机械结构的力学性能、提高安全性与可靠性。结构拓扑优化设计研究起始于经典的 Michell 桁架理论以及分布参数结构的最优布局理论,是结构优化领域的前沿问题。目前复杂连续体结构拓扑优化的主要方法有宏观方法(如水平集方法等)、微观方法(如均匀化方法、变厚度法等)以及基于启发式准则的渐进拓扑优化方法。结构拓扑优化的理论和方法已广泛应用于航空和汽车等工业领域,例如 A380 大型客机的结构设计中采用拓扑优化完成了机尾组件的整体方案设计。相比之下,在我国重大工业装备开发中拓扑优化设计研究与应用几乎是空白。对于巨型重载制造装备,为了提高其在整个工作空间的刚度特性以及在奇异偏载条件下的结构强度和可靠性,结构拓扑优化具有重要的应用价值。

多自由度锻造操作机的控制是十分重要的问题。虽然自适应控制、变结构滑模控制等现代控制方法被广泛应用于多自由度机器人的运动控制,但与一般的多自由度工业机器人相比,重载操作装备的主要特点是系统惯量大,在空载和负载操作时的动力学特性迥异,驱动单元多,极易因参数失配造成系统的不稳定;在操作过程中的载荷不确定性和非连续性,装备的频响特性差,重型操作装备的动力学特性十分复杂,操作过程中易出现典型的非线性特性;锻造操作机与压机以及大锻件要实现协调作业与控制,操作机对环境的力觉感知十分重要。而常用的自适应控制方法、变结构滑模控制方法等都要求在线进行重载操作机的动力学反解,而在不确定、非连续载荷条件下操作机动力学的时变特性为精确的运动控制提出了挑战。针对重载操作装备的控制方法还缺少系统的研究。

大流量大惯性电液伺服控制系统是大型重载装备动力传递及运动控制的首选方式。国外巨型重载装备一般采用全液压、电液联动控制,其液压系统压力高达 60~80 MPa,流量可高达 50 kL/min,单阀最大流量可高达 14 kL/min,响应频率可达 1 kHz。相比之下,我国现有巨型重载装备的最高压力为 32 MPa,流量较低,开关控制,精度低,可靠性差。单阀最大流量 400 L/min,响应频率 350 Hz,远低于世界先进水平,难以满足巨型重载装备的性能要求,目前我国的高压大流量液压元件完全依赖进口。提升液压系统的性能有赖于基础科学研究的突破。大流量、大惯量电液伺服控制系统的流动机理和控制规律的基础研究在国内尚属空白,在国际上也是薄弱环节。

大惯量重载操作装备在极端条件下工作,承受

高达 2.5 MN 以上的非连续载荷, 需要在 1 100~1 250 °C 的高温环境下操作大尺寸工件。在高温状态下的几何测量方面最具代表性的研究项目是美国 OG 公司完成的 HotEye 系统。该研究自 2000 年起先后得到了美国商务部“先进技术计划”、美国能源部“发明与创新计划”和“国家工业竞争力发展计划”的支持, 投入研究经费达数百万美元。目前 HotEye 系统已在热加工工业中得到应用, 可以对温度高达 1 450 °C 以上的工件获得类似室温下的视觉图像。在此基础上 OG 公司又研发了 Smartsmith 系统, 其主要功能是对铸造、钢铁等工业提供基于图像的高温成形过程控制。上述研究的目的是应用先进的测量与控制技术, 使大型锻件的材料利用率提高到 90% 以上。相比之下, 我国重型机械制造行业中大锻件在线测量技术比较落后, 缺少有效的在线测量手段。

巨型重载锻造操作机的主要特征表现在: 大载荷条件下的操作灵巧性; 恶劣工况下长期服役的高可靠性; 大惯量、大载荷高精度快速响应能力。结合国家制造业的重大需求和巨型重载装备的技术发展趋势, 研究大型构件制造操作运动轨迹建模、重载操作装备多自由度操作性能度量与机构设计原理、非连续工况下重载装备界面行为与力学特征、大尺度重型构件稳定夹持原理与夹持系统驱动策略、大流量电液伺服系统的介质流动规律、重载大惯量装备的快速协调控制、巨型重载操作装备的性能仿真与优化等关键共性技术是十分必要的。

因此, 巨型重载锻造操作机研究的关键问题和发展趋势是揭示多自由度重载操作机构构型与操作性能映射规律、重载操作装备的非线性力学行为与界面失效机理、重载操作装备的多源能量传递规律与动态控制, 建立我国自主设计巨型重载操作装备的理论与技术体系和制造能力。

### 3 重型多连杆模锻压机

机械压力机是加工汽车覆盖件的关键冲压设备, 主要适用于薄板件的拉伸、成形、弯曲、校正、冲裁等各种冷冲压工艺, 可广泛用于汽车、拖拉机、电器及国防等领域。在多连杆压力机投入生产使用之前, 世界上所有板料成形、薄板拉伸行业中采用的机械压力机都是传统的曲柄式压力机。但曲柄式压力机的滑块在拉伸过程中运行速度、加速度较大, 容易使拉伸成形中的零件撕裂或起皱, 拉伸件的合格率低、废品率高; 曲柄式压力机使用的模具在上、下模合模的瞬间冲击力较大, 易使主机、模具的零

部件损坏, 造成主机、模具的使用寿命降低; 且曲柄式压力机的负荷工作区域的行程较短, 不适合深拉伸工艺负荷工作区域长的要求; 此外, 采用传统曲柄式压力机时, 成形材料的拉伸速度限制了冲压件的生产速度。这些先天性缺陷极大限制了深拉伸工艺的发展, 生产成本居高不下, 生产效率很低。为解决曲柄式压力机不适应高速发展的汽车、轻工等工业薄板冲压成形、深拉伸等工艺工作的矛盾, 多连杆压力机出现在 20 世纪 50 年代的德国。最早的机型是六连杆肘杆式压力机, 其主要代表是 Shlomman 公司 1957 年生产的、在一次冲压工作行程中能完成载重汽车大梁的落料、弯曲成形、冲孔等工序的闭式单动双点六杆 30 MN 机械压力机。到 20 世纪 60 年代, 世界上已出现六杆、八杆、十杆等不同杆系、不同吨位, 专用于薄板成形、拉伸工艺的多杆单、双、四点机械压力机。

多连杆压力机尤其是大型重载多连杆压力机是压力机技术发展的最新体现<sup>[9]</sup>。使用多连杆驱动的机械压力机, 在驱动机构上采取降低滑块工作行程速度、提高滑块空行程速度的措施, 在不改变压力机工作行程速度的条件下, 即可达到提高生产率、延长模具寿命并降低噪声的目的。多连杆压力机有多种类型, 包括六杆、八杆、十杆等, 滑块方式有单点、多点、单动、双动等。

#### 3.1 国外现状

20 世纪 80 年代以来, 美国、德国、日本、比利时、意大利、法国和前苏联都十分重视大型压力机的技术开发研究工作, 调整产品系列以适应国际汽车工业市场的需求。从各国的技术水平上看, 德国生产压力机的历史悠久且技术实力雄厚; 日本虽然起步晚, 但是情报意识强, 仿制见效快; 法国、英国和意大利虽不能说技术一流, 但是基础雄厚; 前苏联起步早, 但是发展慢, 虽有研制能力, 主要还是依赖进口大型压力机来武装自身的汽车工业; 比利时主要靠兼并企业来转移技术, 开发产品。

从产品开发上看, 1980 年日本日立机械首先为美国 Bendix 公司提供的 60 MN 级的压力机, 成为当时最大的设备。随后, 德国 Weingarten、美国 verson 和日本小松制作所都研制出了 45 MN 级压力机, 德国 Schuler、Erfurt 和前苏联的伏龙尼什重机厂研究出了 42 MN 级的压力机, 日本会田和美国 Danly 公司研制出了 40 MN 级压力机, 意大利 Mecfong 公司研制出了 35 MN 级压力机。进入 90 年代以后, 英国 Verson-Wilkins 公司研制了 25 MN 级压力机, 日本小松制作所研制出了 40 MN 和 45 MN 级的压力机, 日本日立机械为 Rover Group's swidon 冲压厂

生产了一台 50 MN 的压力机,德国 Schuler 为法国 Peugeot mulhouse 汽车制造厂制造了 52 MN 级压力机,并为美国 Ford 公司生产了 60 MN 和 68 MN 级压力机。

### 3.2 国内现状

我国机械压力机工业初创时的底子很薄弱,以传统的曲柄式压力机构型为主力机型。20 世纪 80 年代,随着我国汽车工业的飞速发展,汽车制造工艺的不断改进对汽车覆盖件的冲压设备,机械压力机的工作效率、质量也提出了更高的要求。原一条压力机生产线由一台双动曲柄压力机和 4~6 台单动曲柄压力机组成,第一台双动压力机基本都是用于拉伸工件。为保证工件的拉伸质量,国内许多汽车厂组建冲压生产线时大多采用主传动为多连杆结构的多连杆单动压力机,替代原来采用的双动曲柄压力机所能完成的工作或整条生产线均采用多连杆压力机,以提高模具使用寿命及冲压件质量。

中国汽车工业的快速发展,使国产锻造设备存在的不足日益凸显。其中拥有中国自主知识产权的通用冲压设备多处于较低的水平。相比较而言,国内锻压产品的技术水平不成熟,许多先进技术掌握在西方发达工业国家手中。目前我国主要汽车生产厂约有 90% 的冲压线采用一台双动拉伸压力机和 4~6 台单动压力机组成,大型覆盖件的冲压生产效率低,生产节拍最高只有 3~5 次/min;冲压件质量差;整条冲压线长 60 m 左右,需 20~24 名操作工人,占地面积大、人工成本高,致使冲压件制造成本比国外高 2~3 倍。

20 世纪 80 年代以来,我国相关企业开始与国外企业进行全面技术合作,先后引进日本小松制作所的机械压力机、德国埃尔富特公司的多连杆压力机、德国舒勒公司的高速精密压力机等具有世界先进水平的压力机产品和先进技术,使我国压力机产品在结构、精度、技术性能方面均得到很大提高。但引进生产大型机械压力机技术的形式主要是从日本、德国等企业买图纸,外国企业不提供设计理论和计算方法,使得我国压机没有自主知识产权,产品开发受制于人。

为改变这种状况,国内一些大型企业开始变引进技术为合作生产,与德国穆勒·万加顿、美国 ISI、日本小松、瑞典 ABB、法国 FOREST-LINE、瑞士 GUDOL 等国际高水平公司进行合作生产,消化吸收外方的先进技术,着力提高自身进行新产品开发的核心能力。部分企业开始意识到要打造国际一流机床制造企业,必须拥有具有自主知识产权的核心技术和产品,培育持久的自主技术创新能力,只有

这样才能在国内外市场博弈中赢得主动。在引进、消化、吸收国外先进技术基础上,逐步掌握了多连杆、全自动换模、五轴联动等多项国际先进技术,初步具备了独立开发、制造多连杆压力机和多工位压力机的能力。

虽然国内企业大都感受到增强自主开发新产品核心能力的迫切性,但总体来说,目前国内多连杆压力机主要还是依靠进口技术,生产的多连杆机械压力机由于设计制造水平、工艺水平及加工机床能力和精度的限制,与国际先进水平相比仍存在明显差距,且多数企业还是依靠合作生产和引进技术。受国外厂商技术保护影响,我国难以引进国际最新技术,导致多数企业缺乏自主创新开发手段和能力,产品开发受制于人,在国内外市场竞争中处于不利地位。

多连杆压力机开发的难点和核心是压力机杆系的性能优化设计技术。衡量压力机的性能指标包括:名义压力/吨位、滑块行程、滑块运动特性(位移、速度、加速度)、杆系质量、杆系运动惯量、杆系强度、杆系固有频率等。为保证压力机性能指标的实现,并实现压力机产品的自主创新,必须进行压力机机构构型开发、杆系优化和结构设计,具体包括:多连杆冲压机构构型设计、杆系运动学参数优化、杆系动力学参数优化、零部件拓扑结构优化设计、飞轮设计、杆系动态平衡设计等。

总体说来,国内的上述研究多是各企业的自发行为,偏重于现有产品的性能分析和局部改进,缺乏作更为宏观上的理论方法和技术考虑,没有能够提供指导企业进行新机型设计的理论手段,对引进技术及其蕴含的先进设计思想难以做到真正的消化、吸收,难以有效支持企业的有自主知识产权和专利的新产品开发。国内的多连杆压力机理论研究和软件开发还是缺乏系统性,只就某种机型探讨对应的分析方法并编制专门的程序,解决手头一时之需,缺乏更大程度上的通用性和先进性考虑,难以全面支持企业的新产品开发。企业仍然缺乏进行多连杆压力机性能分析和优化设计的、有效实用的软件手段。而这些理论和软件是无法直接引进的,只能依靠自己的力量自主研究和开发。

针对大型重载多连杆压力机性能分析和优化设计、快速满足个性化市场需求的需要,重点研究大型重载多连杆压力机的杆系性能分析和优化设计的关键技术问题,建立大型重载多连杆压力机杆系性能分析和优化设计的技术与方法,开发大型重载多连杆压力机性能分析与优化设计软件,解决目前我国独立自主开发多连杆压力机水平低、周期长、

能力不足的问题。主要问题包括大型重载多连杆压力机冲压作业任务的特征建模及基于任务特征和性能要求的构型设计、多连杆压力机的运动学性能设计建模和动力学性能设计建模、多连杆压力机的飞轮设计与杆系动平衡设计、压力机的动态载荷分布及构件拓扑结构设计建模、大型重载多连杆压力机的优化设计参数缩聚技术与设计软件开发, 实现优化设计数学模型的有效求解。

## 4 大型数控伺服压机

大型伺服压力机是一种工作原理和构型完全不同于一般多连杆压力机的新型压力机。通过伺服驱动系统及冲压杆系的创新和优化设计, 将大功率伺服电动机等可编程驱动器引入主冲压运动, 根据冲压工艺的要求实现对冲压主运动的主动控制, 从而实现一机多能及冲压工艺的柔性化、程控化和最佳化。所以其功能和性能远比一般数控机械压力机优越, 可极大改善冲压产品的质量, 代表着数控化压力机的最新发展方向。

### 4.1 国外现状

日本企业开发的多连杆伺服压力机产品目前处于世界领先水平。以会田(AIDA)、小松(KOMATSU)、网野(AMINO)等为代表的日本厂商自20世纪90年代开始推出系列化的工业用产品。日本会田公司自1993年起开始独立研发大功率伺服电动机, 并从1997年开始推出NSI-D系列伺服压力机产品。该系列产品由自行研发的大功率伺服电动机经齿轮传动直接驱动曲柄连杆机构进行工作。其独立开发的伺服驱动技术性能优良, 单台伺服电动机可产生高达3 MN的滑块冲压力。日本小松公司先后推出了H1F和H2F等多个系列的多连杆伺服压力机产品, 分别采用伺服电动机经带轮、齿轮或螺杆驱动的六连杆肘杆机构进行工作。其中H1F伺服压力机的冲压能力规格在350~2 000 kN之间, H2F伺服压力机有冲压能力规格2 000 kN、3 000 kN等产品, 还可根据客户提供8 000 kN、10 000 kN等更高规格的伺服压力机产品。日本网野公司自1995年开始研制多连杆伺服压力机, 采用交流伺服电动机作为驱动源, 通过减速器驱动特殊螺杆, 进而驱动对称六连杆肘杆机构, 再带动冲头滑块运动。该公司2005年开发出世界上最大的多连杆伺服压力机, 冲压能力高达25 MN。此外, 还有日本天田(AMADA)公司的SDH系列伺服压力机, 以及山田(YAMADA DOBBY)公司的SVO系列伺服压力机产品。

### 4.2 国内现状

我国大陆目前还没有成熟的伺服压力机产品。图8所示为齐齐哈尔二机床厂和上海交通大学联合开发的双伺服电动机驱动的压力机试验样机<sup>[10]</sup>, 冲压力为2 MN。中国台湾的金丰企业开发了CM1型伺服压力机, 该型压力机可提供的冲压能力在800~2 600 kN之间。



图8 齐齐哈尔二机床厂—上海交通大学联合开发的双电动机伺服驱动压机

与国际水平相比, 国内大型伺服压力机在功率和性能指标上存在较大差距。如日本FANUC、安川可生产150 kW级的交流伺服电动机系列, 日本小松公司在其生产的H2F300伺服压力机中采用了两台135 kW的大功率交流伺服电动机。网野公司的25 MN级多连杆伺服压力机则采用了两台200 kW的大功率交流伺服电动机作为驱动源。我国目前能制造的大功率伺服电动机的功率仍较低, 核心元器件需要进口。阻碍国内伺服压力机研发的主要原因之一是大功率伺服电动机研制水平较低。

伺服压力机研究存在的问题是交流伺服电动机直接驱动具有良好的低速锻冲急回特性, 但缺点是需要大功率电动机; 大功率伺服驱动系统成本高, 影响推广应用; 普通电动机与伺服电动机并联使用的混合驱动型多连杆伺服压力机技术上还不成熟。虽然国外已开发出多种伺服压力机产品及其专用的大功率伺服电动机, 但其设计原理及方法只有很少的文献介绍。因此, 为提高我国大型伺服压力机的研发水平, 必须走自主创新之路。

总体来说, 在我国进行大型伺服压力机的研制, 不仅需要跟踪、模仿国外的先进技术方, 更多的还需要在消化、吸收的基础上发挥勇于创新的精神, 充分考虑到我国伺服驱动技术的发展现状和技术水平, 提出适合我国国情的大型伺服压力机产品创新设计方法与技术。大型伺服压力机发展趋势是研究多伺服电动机的冗余大功率驱动机械协调同步控制技术、压力机的多连杆杆系构型创新和优化设计技术、伺服压力机结构优化设计技术、参数

化的伺服压机冲压工艺规划与运动曲线设置技术、伺服压力机冲压性能保证的参数标定技术、驱动器和电网之间储能技术等。

## 5 重型轧钢装备

我国是世界上第一钢铁生产大国, 2007 年和 2008 年钢材年产量都在 5 亿 t 以上。板带钢是最重要的钢材产品, 在我国约占钢材总量的 43%。国际发达国家, 如日本、美国、法国等, 板带钢的比例达到 60%。随着汽车、造船、石油、化工、建筑、仪表、电子和家用电器等工业的发展, 板带钢的比例在我国还要进一步提高。

大型轧钢设备的服役条件极端恶劣, 作业过程中受到温度场、压力场、流场等多场耦合作用, 装备必须适应 1~100 MN 的突变载荷。热轧装备的轧辊直接与 1 300 °C 左右的高温带钢相接触, 并受到压力高达 10 MPa 除鳞水的冲击, 在高达 20 m/s 的轧制速度下, 仍要保证厚度的偏差在 50 μm 左右。这对装备的控制精度和响应速度带来了极大的挑战。因此, 轧钢装备的突变载荷下的快速响应性和精度是轧钢装备设计的关键问题之一<sup>[11-12]</sup>。

### 5.1 国外现状

轧机是实现金属轧制过程的主要设备。国际上重型轧钢装备的设计理论和技术主要由德国西马克(SMS)、奥地利奥钢联(VAI)、日本的三菱重工和住友金属工业等公司掌握。这些公司具有独立设计和开发重型轧钢装备的能力。20 世纪 60 年代以来轧机在设计、研究和制造方面取得了很大的进展, 使带材冷轧机、厚板轧机、高速线材轧机、H 型材轧机和连轧管机组等性能更加完善, 并出现了轧制速度高达 115 m/s 的线材轧机、全连续式带材冷轧机、5 500 mm 宽厚板轧机和连续式 H 型钢轧机等一系列先进设备。一些适用于连续铸轧、控制轧制等新轧制方法, 以及适应新的产品质量要求和提高经济效益的各种特殊结构的轧机都在发展中。

国外板带材轧机已实现生产过程连续化、轧制规格大型化、轧制速度高速化、操作过程自动化、板带产品质量优质化, 主传动由可控硅向大功率交流变频发展。日本和德国轧钢机产品居世界领先水平。如日本 HTC 公司已为世界提供了 70 多套各类冷轧设备, 德国 SMS 公司也为世界提供了 CVC 型(有四、六辊)多套冷轧机, 并将冷连轧机与其他连轧生产, 进一步提高了冷轧带材生产的经济效益。由于新工艺、新流程和新技术不断涌现, 所以钢铁制造流程向连续、紧凑和高效化发展, 设备大型化、

自动化和信息化技术的应用, 提升了钢铁工业的整体水平。板带轧制设备发展趋势如下所述。① 大型: 一个热带钢连轧生产线的设备在 50 000 t 以上, 厚板轧机一个机架零件的质量可达 500 t。② 重载: 带钢冷连轧机的最大轧制力可达 30 MN, 一台厚板轧机的主电动机功率可达约 20 000 kW。③ 高速: 带钢热连轧机的轧制速度达到 25 m/s, 带钢冷连轧机的轧制速度可达 35 m/s。④ 高温: 工作条件恶劣, 板带热轧的开轧温度约 1 200 °C, 且伴随着咬钢、抛钢的剧烈冲击和氧化铁皮及水雾的影响, 带钢冷轧的温度也达到 200 °C。⑤ 高精度: 冷轧带钢的厚度差精度要求在 ±2~5 μm。⑥ 高自动化: 连铸连轧热带钢生产和冷带钢连轧, 都是实质的过程连续化, 工序紧凑, 整个生产过程都实现计算机自动控制, 如图 9、10 所示。



图 9 SMS 轧机

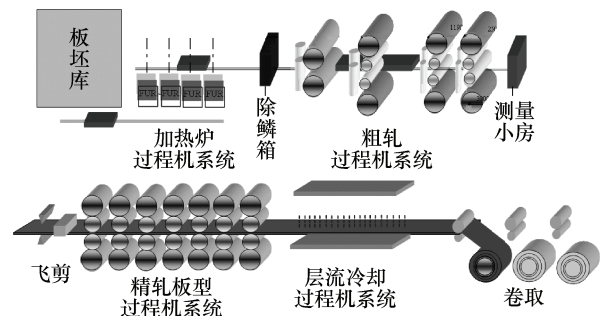


图 10 轧制过程仿真

薄板坯连铸连轧工艺生产线主要类型有德国西马克公司的 CSP 和德马克公司(现已并入西马克公司)的 ISP、意大利达涅利公司的 FTSR、日本住友公司的 QSP 以及奥地利奥钢联的 CONROLL 等, 这些工艺在具体的生产设备配置及工艺技术上各有其特点但大致相同。薄板坯连铸连轧装备的关键技术是: ① 结晶器及浸入式水口是薄板坯连铸连轧工艺成功的突破口, 关键技术结晶器类型有西马克的漏斗形结晶器、达涅利的凸透镜型结晶器、德马克的立弯式结晶器以及奥钢联的平行板型结晶器等, 其发展方向与目的均是有利于浸入式水口的插入及保护渣的熔化, 以便保证在高拉速的情况下铸坯质量; ② 液芯压下和液-固相的轧制两方面是铸轧关

键技术,液芯压下增大结晶器厚度、提高弯月面稳定性和润滑效果、减少中心偏析和疏松、破碎柱状晶,细化晶粒、减少精轧机架数、缩短连铸机和连轧机之间的距离以及加热装置的长度;③拉坯速度高是薄板坯连铸连轧的一个技术特点,改善结晶器的传热、加大冷却强度、减小结晶器铜板厚度、控制保护渣呈薄膜状,西马克和达涅利两家公司的最高拉速均可达8 m/min;④采用辊底式均热炉的作用是均热而不是加热带坯,在铸机和轧机间起一个缓冲衔接作用。均热炉可以使同一带坯温度差为 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,且整条带钢温度均匀;⑤铁素体轧制是在奥氏体状态下将带钢轧制到一定厚度后,通过强冷使带钢迅速完成 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变,在带钢处于全铁素体状态下,后面的机架将带钢轧制到最终厚度;⑥半无头轧制可生产超薄带钢和宽而薄的带钢,拓宽产品大纲而不降低收得率,提高了收得率和生产率。目前德国西马克CSP和达涅利FTSC生产线可轧制的最薄规格为0.8 mm,如此厚度的热轧卷已经替代了部分冷轧薄板,并且呈现良好的发展趋势。从生产的现有钢种看,薄板坯连铸连轧可以覆盖大多数热轧带钢的品种,但还不能生产出一些性能要求高和附加值高的钢材。就目前薄板坯连铸连轧工艺的发展状况来看,所能生产的产品品种有限,尚须进一步研究开发的钢种有汽车面板、超深冲钢板和表面质量要求高的钢板、搪瓷钢板、镀锡钢板的基板、高级别的高强韧性管线钢、奥氏体不锈钢板、碳的质量分数大于0.5%的高碳钢板、部分电工钢等。

## 5.2 国内现状

我国是钢铁生产大国,但与钢铁强国相比,我国在重大冶金成套设备的设计制造等方面还有较大差距,目前国内的冶金装备一些核心部件或关键设备还需要进口,高端的冶金装备属自主创新研发的较少,仍依赖于进口国外产品。在大型板材、管材和型钢连轧机组我国尚不能自主研制,新机型开发能力低,自动化控制技术缺少可靠性,数学模型建立和系统集成能力差。我国缺少对成套设备工艺系统的力学描述及其相关的数学模型建立理论,而反映机械系统的结构形式及其力学关系、调控关系的数学模型,决定了现代轧机能否实现自主研发的技术关键。近年来,鞍钢股份有限公司率先在热连轧、冷连轧依靠国内力量自主研发了冷热连轧机,而控制模型主体上仍依靠国外。据初步统计,近20年,钢铁工业引进装备已达200多亿美元,而同期冶金设备国内产值也不过2000多亿人民币。新近引进的曹妃店工程、前期天津引进的大口径无缝钢管生

产线和马钢引进的大型H型钢生产线等,都表示着我国大型冶金设备的设计能力和自主研发能力不足。因此,为了解决我国热轧板、冷轧板、轿车用板、石油管、镀锌板、镀锡板、家电用板、集装箱用板等13个品种短缺的问题,开展冶金重大装备的基础科学问题和自主设计关键技术研究对提高我国轧钢工艺技术和装备设计水平、增加关键品种钢材生产能力、提高我国钢铁工业国际竞争力有着十分重要的意义。

我国尚不完全掌握板坯连铸机的连续弯曲、连续矫直技术,小辊径密排分段辊、结晶器铜板潜水槽密布、结晶器非正弦振动、扇形段液压压下等先进技术,缺乏高速板坯连铸机、大型真空处理装置等技术、系统的轧机控制模型理论和电气传动与自动化控制技术;还不能自主设计大型板材连轧机所需的定宽压力机和辊型调整机构以及4 m以上规格宽厚板轧机。

国内提供的轧机产品的性能仍不稳定,缺乏轧机板形控制核心技术的系统研究;轧钢传动装备中高性能控制器、交直交变频传动系统仍须引进,缺少具有自主知识产权的高性能控制平台和电气及自动化控制方面软、硬件配套支持,设备和自动化之间的衔接和协调技术与国际先进水平还有差距;轧钢成套设备中的飞剪机、卷取机等在功能和可靠性方面与国外仍存在较大的差距。

与国外先进水平相比,我国的差距表现在板带钢比例不够大,国内43%,国外发达国家60%,高端产品少,如缺乏高等级汽车板、高性能厚板;设备设计模仿较多,缺少系统的设计理论和计算方法,如轧机性能分析、可靠性分析、故障诊断、机型分析和选择;工艺设备控制数学模型依赖进口,这是制约我国轧制设备和技术发展的瓶颈和关键。我国应该重点研究轧制设备设计理论和方法,包括轧机性能设计、可靠性设计、故障诊断、寿命评估、机电液耦合设计等;轧制设备控制数学模型和与控制技术,包括厚板平面形状测量与控制、热轧带钢凸度和平直度控制、冷轧带钢平直度控制、热轧带钢组织性能控制;工艺设计理论和方法:轧制规程设计、冷却工艺设计、润滑工艺设计等;轧制基本理论,包括轧件变形理论、轧辊变形理论、摩擦磨损理论、润滑理论等。

## 6 重型多轴镗铣数控装备

随着世界经济融合进一步加强,制造中心向中国转移,我国机床消费居世界首位(2007年中国消

费世界机床产值的 23.9%)，在 2020 年前相当一段时间内中国机床市场具有高速增长的动力。尤其造船、电力、航空航天、交通运输、国防军工等行业对重型机床需求很大。从机床市场需求趋势看，普通机床的需求量将大幅减少，数控机床需求将明显增多，尤其是对“高、精、尖”高档、大重型机床的需求，决定了企业产品必须向着高技术含量、大规格的产品方向发展。

### 6.1 国外现状

数控落地式镗铣床由于其开放式结构，特别适用于大型核电容器封头、化工行业大型加氢容器封头、大型汽轮机转子及叶片、航天运载火箭舱体等大型零件复杂曲面加工和曲面上的深孔加工，所以该类机床广泛应用于核电、航空航天、造船和化工等领域。长期以来，德国、意大利、捷克、西班牙、日本、法国、英国、美国和前苏联等国都十分重视数控落地式镗铣床的技术开发研究工作，各国都调整产品系列以适应国际航空航天、核电、造船和化工行业市场发展的需求。从各国的技术水平上看德国企业开发的数控落地式镗铣床产品目前处于世界领先水平。以 Scharmann 公司、瓦德里科堡(WALDRICH-COBURG)公司、Schiess 公司、沃坦公司等为代表的德国厂商自 20 世纪 80 年代开始推出系列化的数控落地式镗铣床产品。

德国 Scharmann 公司自 20 世纪 70 年代初开始研制生产数控落地式镗铣床，最新研制出的 Heavy speed 系列高速五轴数控落地式镗铣床，其  $x$  轴快速移动高达 25m/min， $y$ 、 $z$ 、 $w$  轴快速移动可达到 15 m/min；瓦德里科堡(WALDRICH-COBURG)公司生产的数控落地式镗铣床主轴最高转速为 2 500 r/min， $x$  轴快速移动速度可达到 20 m/min，主轴箱行程可达到 8 m；Schiess 公司生产的五轴数控落地式镗铣床主轴最高转速可达到 3 000 r/min，滑枕尺寸为 670 mm×640 mm，主轴箱行程为 6 m。

意大利的 Pama 公司推出的 SPEEDRAM1000 型主轴直径从 130~160 mm，功率为 37 kW， $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $w$  轴快速移动可达 30 m/min；主轴最高转速高达 4 000 r/min；SPEEDRAM5000 型的主轴直径从 225 到 260 mm，功率为 130 kW， $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $w$  轴快速移动可达 10 m/min；主轴最高转速可达到 1 300 r/min。Innse 公司新推出的 Zenith 型数控落地式镗铣床镗轴直径为 300 mm，主轴箱行程可达到 10 m。

日本三菱公司<sup>[11]</sup>生产的 180BN/C 数控落地式镗铣床  $x/y/z/w$  的行程分别为 16 000 mm、4 000 mm、1 200 mm、1 200 mm，铣轴直径 240 mm；转速：11~2 800 r/min；工作台纵向行程：1 700 mm。

法国 FOREST-LINE 公司生产的 GIMAX160 数

控落地式镗铣床转速 2~1 500 r/min，镗轴直径 160 mm， $x/y/z/w$  的行程分别为 6 000 mm、3 000 mm、800 mm、1 000 mm。

捷克 SKODA 公司生产的数控落地式镗铣床主轴最高转速可达到 3 000 r/min，快速移动可达 15 m/min 并配有高速镗铣头，以提高加工效率。

虽然国外已开发出一系列数控落地式镗铣床产品，但其设计原理及方法仍处于严格的保密状态，只有少量产品介绍性文献可查。因此，为提高我国巨五轴数控落地式镗铣床的研发水平，必须走自主创新之路。

### 6.2 国内现状

我国从 20 世纪 70 年代初开始研制数控落地式镗铣床，特别是 20 世纪 80 年代以来，我国相关企业开始与国外企业进行全面技术合作，先后从意大利茵塞公司、捷克斯克达公司、德国沃坦公司等引进了具有世界先进水平的数控落地式镗铣床产品和技术，使我国数控落地式镗铣床产品在结构、精度、技术性能方面均得到很大提高。但引进生产数控机床技术的形式主要是从德国、意大利、法国、捷克等国的企业买图纸，外国企业不提供设计理论、计算方法和关键零部件的制造工艺，换个型号就要再花钱，或者按比例缩放来进行类比产品开发，关键零部件还要从国外公司购买。技术上没有自主知识产权，受制于人，产品开发受到极大限制。

为改变这种状况，国内一些大型企业开始变引进技术为合作生产，具有代表性的是：齐齐哈尔第二机床集团公司与意大利茵塞公司合作生产了 FA-B200A 型数控落地式镗铣床，逐步掌握了数控落地式镗铣床的结构、进给系统、三轴联动等多项国际先进技术。上海重型机器有限公司和武昌船厂分别研制生产了 TK6913、TK6916 型落地镗铣床和 TK6916/35×80 型数控落地镗铣床。中捷机床有限公司在引进德国、日本、意大利的先进技术、消化吸收和合作生产基础上，在国家科技部创新基金的资助下，成功研制生产出了 TK6913B 落地式数控镗铣床，配上万能铣头可实现五面加工。武汉重型机床有限责任公司与德国席士公司合作生产的 FB260 落地式数控镗铣床已上海电机厂投入生产。济南二机床集团有限公司与法国 FOREST-LINE 公司双方联合设计，联合生产了 CIMAX160 数控落地式镗铣床基础上，于 2005 年又推出了 CIMAX200A 数控落地式镗铣床。

近年来，虽然随国家经济建设健康高速发展，我国数控落地式镗铣床技术得到了快速发展和长足进步，但在主机的关键部件、关键技术以及功能部件等方面目前仍以国外产品为主，自主开发还有一

定的差距。仍要依靠国外技术, 尚未完全形成自主创新研发新产品、拥有自主知识产权与核心技术的能力, 特别是巨型五轴数控落地式镗铣机床基本上全依靠进口解决, 价格相当昂贵。国内数控落地式镗铣机床工业应用水平和工业发达国家相比存在较大的差距, 主要差距体现在设计上, 我国企业缺乏系统的大型数控镗铣床动力学特性设计和拓扑结构优化设计技术; 缺乏大型数控镗铣床过约束大型滑枕刚度自适应补偿设计技术; 缺乏大型镗铣用重载翻转工作台功能部件的设计技术; 缺乏自主知识产权的多轴控制系统; 同时在产品的运行速度、进给速度、制造工艺水平上还有较大差距, 特别是巨型重载五轴数控机床开发能力相当落后。

国外新型重型数控铣镗床的发展呈现出许多新的特点。产品设计理念不断更新, 体现出产品设计将装饰艺术与精细加工的完美结合; 产品结构的不断创新, 显示了机床在向高速、高精、高效发展的同时, 还向人性化、精细化制造的方向发展。例如德国生产的重型卧式数控铣镗床采用滑枕式(无镗轴)结构, 使得机床刚性好、行程长、移动速度快、截面大。高速铣削已不再局限于传统的铣削方法, 现代铣削加工, 由各种功能附件通过滑枕完成, 已有替代传统加工的趋势, 其优点不仅是铣削的速度、效率高, 更主要是可进行多面和曲面加工, 这是传统加工无法完成的。卧式镗铣床技术发展呈现新的特点, 在提高进给速度和快速移动速度的同时, 又出现了提高加速度这一新的概念, 提高起动加速度, 以提高速度挖掘机床的潜力。而落地式铣镗床则向着高行程、高速切削的方向发展, 给落地式铣镗床的结构带来了变化, 不仅变得结构更庞大, 其刚性较高, 滑枕导向结构采用线性导轨, 直线电动机驱动, 使得切削速度越来越快。

综上所述, 数控铣镗床的发展趋势向着大型化、高精度、高速度、自动化、智能化、多样化、复合化、成套性、综合性的趋势发展; 设计朝着更人性化、柔性化的趋势发展; 功能附件呈高速、重载多轴联动、结构型式多样化发展。如定位精度向纳米级发展、重型数控机床主轴转数向  $4 \text{ kr/min}$  发展, 快速移动将达到  $160 \text{ m/min}$ , 可控轴增多及五轴联动化。

## 7 重型制造装备领域未来发展研究方向和重要科学与技术问题

由于极端服役大型复杂装备及其构件的制造依赖于巨型重载制造装备, 因此重型制造装备体现

国家极端制造能力和制造水平。重型制造装备包括大型模锻压机、自由锻造压机、重型锻造操作机、轧钢机、重型机床等, 特点是尺度巨型、载荷巨大、惯量巨大、自由度多、力位操控能力强、服役环境复杂等。这些重型制造装备的设计面临许多共性的科学和技术挑战。总体上讲, 我国已积累了一定的重型制造装备研发基础和经验, 但在重型制造装备的自主设计理论和技术研究上与发达国家相比还有明显的差距。目前急需解决的主要基础科学共性问题如下所述。

### 7.1 重型制造装备工艺参数模型与性能评价

大型构件制造是材料在三维空间进行宏观尺度重新分配成形或去除的加工过程, 同时也是在微观尺度调控内部组织结构的优化演变的过程, 全过程由制造装备和操作装备按照目标空间, 夹持、调整和形成构件的空间位置并协同完成制造任务。工艺参数设计是重型制造装备如大型模锻压机、自由锻造压机、重型锻造操作机、轧钢机、重型机床等设计理论研究的前提和关键问题之一, 研究被制造对象的材料物理状态及其对制造装备的交互作用规律, 建立制造装备的工艺参数、制造规程、冷却工艺、润滑工艺等设计理论。

### 7.2 重型制造装备机构和结构的拓扑与性能的映射规律

重型制造装备具有尺度巨型、载荷巨大、惯量巨大、自由度多、力位操控能力强等特征。制造过程中要实现大型构件的多维精确位姿操作, 要求重型制造装备具备全工作空间的灵巧精确操作性、大承载能力和高刚度特性等。该类装备中力流传递复杂, 易产生奇异应力状态, 导致装备性能衰退甚至结构破坏, 其非线性力学行为和超静定特征对机构与结构设计以及力学性能优化设计提出了挑战。由于装备运动副与制造界面载荷力巨大, 在非连续工况下呈多重非线性接触, 与常规工况下的接触界面行为存在本质差别, 传统的润滑、磨损、蠕变分析方法与设计准则难以适用。因此, 重型制造装备的设计需要研究装备机构拓扑与任务特征的映射规律、重载制造装备的力位可操作性、灵巧性、解耦与可约性度量 and 评价模型、重载装备性能与机构及其结构参数映射规律、高能量冗余输入与动平衡机理、重载均载与刚度综合理论等; 研究交变重载、高温、非连续工况对摩擦副表面结构、润滑性能演变、摩擦副损伤及润滑失效行为的影响规律, 复杂工况环境下重载装备的多自由度刚柔体系统的非线性动力学行为, 非稳态力场下润滑状态转换规律; 极端服役重型制造装备的可靠性与性能衰退规律。

### 7.3 重型制造装备大功率高精度快响应运动与动力容错驱动规律

在重载制造装备各子系统协调作业过程中, 装备的多维复杂运动与强外场作用相互耦合, 影响装备中的多源能量传递。巨型重载制造装备如大型锻造压机、巨型锻造操作机、轧钢机等电液伺服系统具有大流量大流差特点, 局部流速剧变伴随随机空化, 对电液伺服系统形成强非线性干扰, 影响重载装备的操作精度、稳定性、频响特性; 大惯量、大载荷、时滞、死区等非线性特性易对装备的动态响应形成干扰, 造成制造过程中的振荡、爬行。在大型构件制造过程中, 重载装备操作界面的能量密度极高, 装备的力、热以及系统中的电、液等多场复合作用十分显著, 子系统之间的能量传递规律极其复杂。大惯量、大载荷易导致装备操作过程中的迟滞、爬行和振荡, 影响装备的频响特性。因此, 研究重型制造装备电液伺服系统的介质流动机理, 时变重载大流量非线性电液伺服系统的动态响应规律, 大流量电液伺服系统的动态补偿新方法, 复杂流道内的非定常流动机理和数值模拟, 高压密闭腔中大流差空化机理及抑制方法, 并联冗余输入系统电液伺服系统的控制; 建立大功率高精度快响应运动与动力伺服驱动容错系统设计理论。

### 7.4 重载制造装备多变量强耦合机电液多系统交互作用与控制规律

重载制造装备惯量大, 在空载和负载操作条件下其动力学特性迥异, 系统具有典型的变结构特征, 非连续载荷作用下重载装备具有明显非线性特征, 状态测量与反馈十分困难。重型制造装备是多变量强耦合机电液多系统, 复杂加工工艺要求装备大功率输出的同时实现多维运动精准控制。因此, 揭示多约束条件下构件成形操作运动轨迹的形成机理, 研究设备工艺控制数学模型, 探讨大构件制造加工装备与操作装备运动协调特征, 提出面向制造工艺的制造装备运动轨迹规划方法, 研究不同类型大型构件制造过程的时空变形规律, 分析具有时变特性的形变位移与具有调节特性的设计位移之间的融合机理; 研究装备的运动学标定和动力学参数以及控制模型的辨识新方法, 探讨非连续载荷和不同工况下的变结构控制方法及其动态无扰动切换策略, 建立大惯量重载制造装备控制的预测补偿模型, 建立重载非连续工况条件下重载制造装备的快速响应控制方法; 研究过约束条件下基于最优载荷分配的操作控制方法, 建立操作过程中基于力反馈的顺应控制方法和多装备协调运动控制方法。

## 8 结论

极端服役的重型制造装备设计与制造理论研究影响国家经济和国防重大工程建设, 寻求该类装备的设计性能衰退内在的统一规律, 理解其外在显现的多样性, 在各种极端条件下不断探索和开发极端服役重型制造装备新的研究领域是十分必要的。本文以代表性的重型制造装备为对象, 研究该领域国内外发展现状和趋势, 提出重型制造装备面临的基础科学与技术问题, 即重型制造装备工艺参数模型与性能评价、装备机构和结构拓扑与性能的映射规律、重型制造装备大功率高精度快响应运动与动力容错驱动规律、重载制造装备多变量强耦合机电液多系统交互作用与控制规律等。本文将为我国重型制造装备的发展战略研究提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械与制造科学(学科发展战略研究报告 2006 年~2010 年)[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
Department of Engineering and Materials Science, National Natural Science Foundation of China. Machinery and manufacturing science (Research report of subject development strategy 2006 ~ 2010)[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [2] 中国机械工业联合会科技工作部. “十五”我国数控技术及装备发展情况[J]. 中国制造业信息化, 2005(3): 40-43.  
Sci&Tech Department of China Machinery Industry Federation. Development of China numerical control technology and equipments during the Tenth Five-year Plan[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2005(3): 40-43.
- [3] 孙荣创. 数控技术及装备的发展趋势及策略[J]. 中国科技信息, 2006(12): 121-122.  
SUN Rongchuang. Development trend and strategy of numerical control technology and equipments[J]. China Science and Technology Information, 2006(12): 121-122.
- [4] 谢友柏. 现代设计理论和方法研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 1-9.  
XIE Youbai. Study on modern design theory and methodology[J]. Chinese Journal of Mechanical and Engineering, 2004, 40(4): 1-9.
- [5] 闻邦椿, 张国忠, 柳洪义. 面向产品广义质量的综合设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

- WEN Bangchun, ZHANG Guozhong, LIU Hongyi. Synthesis design theory and methodology aimed to generalization quality of products[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [6] ROY U, BHARADWAJ B. Design with part behaviors: Behavior model, representation and applications[J]. Computer-Aided Design, 2002, 34: 613-636.
- [7] HUANG Z, LI Q C. General methodology for type synthesis of lower-mobility symmetrical parallel manipulators and several novel manipulators[J]. International Journal of Robotics Research, 2002(21): 131-146.
- [8] GAO Feng, LI Weimin, ZHAO Xianchao, et al. New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002(37): 1395-1411.
- [9] TSO P L, LIANG K C. A nine-bar linkage for mechanical forming presses[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42: 139-145.
- [10] Guo Weizhong, GAO Feng. Design of a servo mechanical press with redundant actuation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(4): 574-579.
- [11] SEKHAVAT P, WU Q, SEPEHRI N. Impact control in hydraulic actuators[J]. Transactions of the ASME: J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2005, 127(2): 197-205.
- [12] JIN N, ZHOU S, CHANG T. Identification of impacting factors of surface defects in hot rolling processes using multi-level regression analysis[J]. Transactions of NAMRI/SME, 2004, 32: 557-564.

---

作者简介: 高峰, 男, 1956年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为并联机器人机构学及应用关键技术。

E-mail: fengg@sjtu.edu.cn